

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.10077

龙婷, 陈杰, 杨蓝, 王寅, 徐超, 李景文, 李俊清. 极小种群东北红豆杉所在群落特征及其环境解释[J]. 植物科学学报, 2020, 38(1): 77~87
Long T, Chen J, Yang L, Wang Y, Xu C, Li JW, Li JQ. Characteristics and environmental interpretation of communities of *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc., a plant species with extremely small populations[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(1): 77~87

极小种群东北红豆杉所在群落特征及其环境解释

龙婷, 陈杰, 杨蓝, 王寅, 徐超, 李景文*, 李俊清

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 以东北红豆杉(*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)所在群落为对象, 选择有东北红豆杉分布的21个样方进行群落调查, 结合样方植物和环境数据, 采用系统聚类、RDA分析、方差分解等方法研究东北红豆杉所在群落的特征及其主要影响因素。结果表明: (1)东北红豆杉所在群落共记录到48科90属107种植物, 其物种组成丰富, 可将群落划分为红松-紫椴林、红松-云杉-冷杉林、红松-槭树林、红松-风桦林4个林分类型; (2)温度、降水、林分类型和土壤pH等环境因子显著影响东北红豆杉的分布及其群落特征, 整体上温度是最显著的影响因子, 但在不同林型中各环境因子的主要作用不同; (3)气候因子、地形与土壤因子、生物因子三者对东北红豆杉所在群落分布的共同解释率为49.85%, 地形与土壤因子的单独解释力最大(15.70%), 其次为气候因子(14.96%)和生物因子(9.79%)。总之, 由于自然和人为因素的干扰, 东北红豆杉所处的群落类型多样, 且东北红豆杉种群特征在不同的群落中各不相同, 主要分布在红松-紫椴林和红松-云杉-冷杉林中, 其他2种群落类型对回归保护地的选择具有很好的指示作用, 应针对不同的分布群落采取不同的保护措施。

关键词: 东北红豆杉; 群落特征; 植物组成; 环境因子

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)01-0077-11

Characteristics and environmental interpretation of communities of *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc., a plant species with extremely small populations

Long Ting, Chen Jie, Yang Lan, Wang Yin, Xu Chao, Li Jing-Wen*, Li Jun-Qing

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In this paper, the *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. community was taken as a breakthrough point, and 21 plots with *Taxus cuspidata* distribution were selected for community survey. From the sampled plant and environmental data, the characteristics and main influencing factors of *Taxus cuspidata* communities were studied by systematic clustering, RDA analysis, and variance decomposition. Results showed that: (1) A total of 107 species belonging to 90 genera and 48 families were recorded, and *Taxus cuspidata* communities exhibited high species richness. The *Taxus cuspidata* communities could be divided into four types: i. e., *Pinus koraiensis* - *Tilia amurensis* forest, *Pinus koraiensis* - *Picea jezoensis* - *Abies nephrolepis* forest, *Pinus koraiensis* - *Acer* forest, and *Pinus koraiensis* - *Betula costata* forest. (2) Temperature, precipitation, forest type, and soil pH significantly affected species composition of the *Taxus cuspidata* communities, with overall temperature being the most significant factor. However, the main effects of environmental factors in

收稿日期: 2019-06-17, 退修日期: 2019-07-16。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503106)。

This work was supported by a grant from the National Key Research and Development Plan Project (2016YFC0503106).

作者简介: 龙婷(1994-), 女, 博士研究生, 研究方向为生物多样性与恢复生态学(E-mail: 741241478@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: lijingwen@bjfu.edu.cn)。

different forest types were different. (3) Climatic, topographic, soil, and biological factors jointly explained 49.85% of *Taxus cuspidata* community distribution. Among the above factors, topographic and soil factors had the largest individual explanatory power (15.70%), followed by climatic (14.96%) and biological factors (9.79%). In conclusion, due to both natural and human interference, the *Taxus cuspidata* communities are diverse, and the population characteristics of *Taxus cuspidata* is different among the communities. *Taxus cuspidata* is mainly distributed in *Pinus koraiensis*–*Tilia amurensis* and *Pinus koraiensis*–*Picea jezoensis*–*Abies nephrolepis* forests, and the other two community types have a guiding significance for *Taxus cuspidata* reintroduction protection. In addition, different protection measures should be considered for the different community types.

Key words: *Taxus cuspidata*; Community characteristics; Plants composition; Environmental factors

植物群落是某一特定空间或生境下,不同植物种群之间形成的稳定的植物集合体,是地理环境和历史发展综合作用的集中表现^[1]。植物群落通常具有一定的物种组成、外貌和结构、动态等特征,其空间分布常受到气候、地形、海拔、土壤等因素的影响^[2-4]。研究植物群落与环境因子之间的关系对阐明植物群落的形成与维持、植物种群的生长和动态具有重要意义。

东北红豆杉(*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)是我国重点保护濒危植物和极小种群物种,由于其分布的天然林遭受过度采伐导致野生种群锐减,特别是紫杉醇的发现和利用^[5]更是加剧了人为干扰强度。在长期人为干扰下,东北红豆杉天然种群急剧减少,适宜分布区锐减,生境破碎化严重,且在自然条件下种群更新困难、生长缓慢,该物种正处于种群衰退的濒危状态^[6],并被列入《国家重点保护野生植物名录》、《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划(2011–2015)》中^[7]。天然东北红豆杉种群生境恢复和种群保护工作迫在眉睫。

目前东北红豆杉的研究主要集中在化学成分提取^[8, 9]和人工繁殖培育幼苗^[10, 11]等方面,20世纪90年代,吴榜华等^[12]对东北红豆杉种群进行了初步探索,而后刘彤^[13]、周志强等^[14]在黑龙江省穆棱自然保护区也进行了相关研究。但整体而言,其生态学、生物学特性等基础研究还较缺乏,特别是缺乏对其分布范围的群落进行系统而全面的调查数据,且近年来由于各种人为干扰致使东北红豆杉所在的群落类型与特征发生了很大的变化。在此,我们对现存天然东北红豆杉分布的群落类

型、群落特征及其主要影响因子进行研究,以期为东北红豆杉不同保护措施的制定提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

根据野外踏查并结合文献记载^[15],我国东北红豆杉主要分布在黑龙江省穆棱保护区,以及沿长白山脉的吉林省延边朝鲜族自治州、白山市、临江市和辽宁省老秃顶子保护区、白石砬子保护区。本研究在东北红豆杉主要分布区内共布设21个临时样方(图1),地理位置为40°54'~44°9'N、124°47'~130°41'E,海拔553~1068 m,调查区多为丘陵和山地,属温带季风气候区,春季气候变化剧烈,昼夜温差大,夏季温暖多雨、雨热同季,冬季寒冷干燥,地带性植被主要为温带针阔混交林。

1.2 群落调查方法

根据野外踏查并结合文献记载,选取有天然东北红豆杉分布的植物群落布设21个20 m×50 m的临时样方,将每个样方划分为10个10 m×10 m的小样方,在每个小样方内布设1个5 m×5 m的灌木样方和1个3 m×3 m的草本样方。采用方精云等^[16]的群落调查方法,记录样方的经度、纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、郁闭度等环境因子,并分别调查样方内所有乔木(胸径≥4 cm)的种类、株数、胸径、树高、冠幅等;灌木样方内灌木的种类、株数、平均高度、盖度等;草本样方内所有草本的种类、株数、平均高度、盖度等。

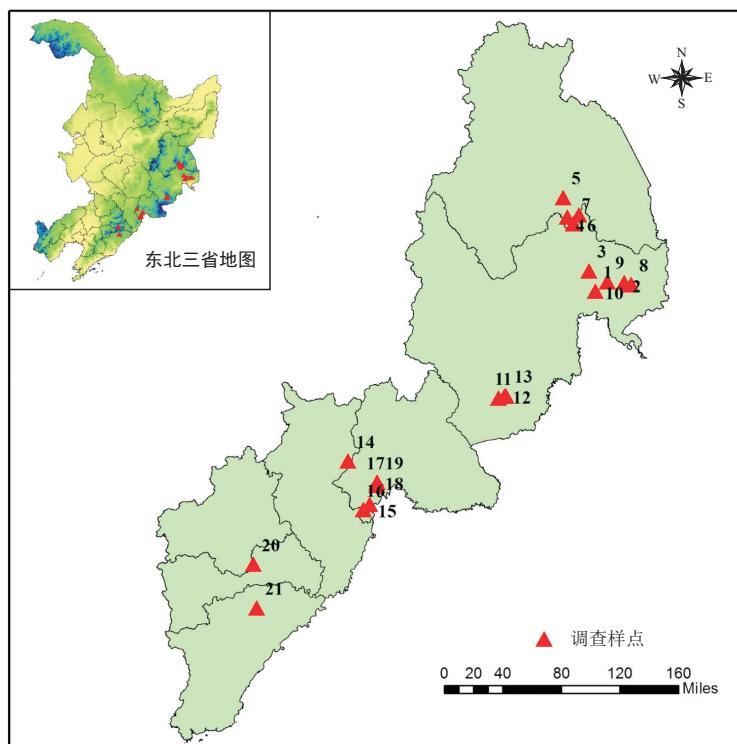


图1 东北红豆杉所在群落调查样方分布图
Fig. 1 Distribution of sampling plots of *Taxus cuspidata* communities

1.3 土壤数据和气候数据获取

在样方对角线上取3份0~20 cm的表层土、混合, 将土壤样品装入塑封袋中带回实验室自然风干, 用于测定土壤理化性质。具体测定方法如下: 重络酸钾容量法测定土壤有机质; 烘干法测定土壤含水量; 凯氏定氮法测定土壤全氮含量; 火焰光度计法测定全钾含量; 钼锑抗比色法测定土壤全磷含量; 碳酸氢钠浸提-分光光度法测定土壤速效磷含量; 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾含量; 扩散皿法测定土壤碱解氮含量^[17]。

本研究的气候数据来源于世界气候数据网站 (<http://www.worldclim.org>), 利用该网站提供的全球1 km × 1 km 分辨率下最新数据包(Bioclimatic variables)内近30年的气候数据, 提取年平均温度、夏季平均温度、冬季平均温度、年降水量、降水季节性等气候数据作为本研究气候基础数据。

1.4 数据分析

1.4.1 植物种鉴定和统计

在野外调查、拍照和标本采集的基础上, 对照《Flora of China》电子版(<http://foc.ipplant.cn>)进行物种鉴定并统计科、属、种。根据统计结果和样方数据, 计算各物种相对密度、相对频度、相对优势

度(乔木物种)或相对盖度(灌木和草本物种), 以及每个样方中每种植物的重要值^[18, 19]。采用每个样方群落的物种丰富度、香农指数、辛普森指数和均匀度指数测度各群落的多样性^[20, 21]。

1.4.2 数据处理

统计每个样方的乔木物种种类和重要值, 采用Ward最小方差法对乔木树种进行系统聚类分析, 并依据《中国植被》的分类原则, 结合实际生境特点、群落结构、物种优势度和物种组成来划分林型。

统计各样方的所有植物种类和重要值, 得到21(样方) × 107(物种)维的物种重要值矩阵。在数量生态学中^[22], 常用直接排序法来探讨物种组成和样地性质之间的关系, 因此先对物种矩阵进行除趋势对应分析(DCA), 得到第1轴的长度为2.0835, 故采用冗余分析(RDA)描述本研究各群落分布与环境因子的关系, 并找出影响群落分布的显著影响因子。

基于冗余分析, 利用前向选择和AIC模型筛选对所有环境变量进行筛选, 得到坡度、坡向、土壤pH、林型、郁闭度、年降水、降水季节性、年平均温度、夏季平均温度、冬季平均温度共10个

较显著的环境因子。但由于气候因子之间的共线性较高,为了避免各变量间的线性关系对回归方程的影响,本研究将年平均温度、夏季平均温度、冬季平均温度进行主成分分析,取第1轴(第1轴累计方差贡献率为0.8498)作为温度因子,将年降水和降水季节性进行主成分分析,取第1轴(第1轴累计方差贡献率为0.8871)作为降水因子,最终得到7个环境因子(坡度、坡向、土壤pH、林型、郁闭度、温度、降水),即21(样方)×7(环境变量)维的环境数据矩阵。其中,将林型转化为定量变量,按照聚类结果将林分类型分别赋值为1、2、3、4,数值越大表示阔叶树种所占比例越高、针叶树种所占比例越低。同时根据参考文献^[23]将坡向方位角进行转化。最后利用物种矩阵和环境矩阵进行RDA排序,分析东北红豆杉所在群落分布和环境因子之间的关系,并进行蒙特卡罗置换检验。

将7个环境因子划分为3类:(1)气候因子:降水、温度;(2)地形与土壤因子:坡度、坡向、土壤pH;(3)生物因子:林型、郁闭度。在RDA的基础上进行方差分解,定量分析各类环境因子对群落分布的解释力大小。

2 结果与分析

2.1 东北红豆杉所在群落物种组成

经调查,共记录到植物48科90属107种¹⁾。其中,乔木13科20属28种,占全部物种的25.23%;灌木12科20属24种,占全部物种的21.62%;草本29科50属55种,占全部物种的49.55%。整体上乔、灌、草生活型比例为5:4:10。在所有的科、属中,蔷薇科物种最多(8:9=属:种,下同),其次是虎耳草科(5:7)、槭树科(1:7)、百合科(6:6)、毛茛科(6:6)、桦木科(3:5)等;最大的属为槭属(7种)和薹草属(3种)。群落内出现频度较大(频度>80%)的乔木有紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、花楷槭(*Acer ukurunduense* Trautv. et Mey.)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* Carr. var. *microsperma* (Lindl.) Cheng et L. K. Fu)等;出现频度较大的灌木有刺五加(*Acanthopanax senticosus* (Rupr. Maxim.) Harms)、狗枣

猕猴桃(*Actinidia kolomikta* (Maxim. & Rupr.) Maxim.)、黄心卫矛(*Euonymus macropterus* Rupr.)等;出现频度较大的草本植物有粗茎鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma* Nakai)、东北蹄盖蕨(*Athyrium brevifrons* Nakai ex Kitagawa)、酢浆草(*Oxalis corniculata* L.)等(表1)。可见,东北红豆杉所在群落物种组成丰富,生活型结构良好,具有典型的温带植物群落特征。

2.2 东北红豆杉所在群落特征

2.2.1 东北红豆杉所在群落类型及其特征

东北红豆杉所在群落的类型受自然和人为干扰程度的影响较复杂,结合调查样方的乔木树种组成进行系统聚类分析,结果可将东北红豆杉所在群落划分为4个主要类型(图2),现分述如下。

(1)红松-紫椴林

有11个样方为红松-紫椴林(样方1、2、4、6、7、9、12、13、15、16、19),分布于海拔638~1068 m。乔木优势树种为红松和紫椴;臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.)、鱼鳞云杉、东北红豆杉等物种的优势度和密度次之。灌木层、草本层的优势物种主要为狗枣猕猴桃、刺五加、东北茶藨子(*Ribes mandshuricum* (Maxim.) Kom.)、酢浆草、粗茎鳞毛蕨、舞鹤草(*Majanthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt)等。

(2)红松-云杉-冷杉林

有6个样方为红松-云杉-冷杉林(样方3、8、10、11、14、17),分布于海拔553~953 m。乔木优势树种为红松、臭冷杉、鱼鳞云杉;其它乔木树种还有东北红豆杉、紫椴、花楷槭等,但优势度较低。灌木层、草本层的优势物种有狗枣猕猴桃、黄心卫矛、东北蹄盖蕨、东北羊角芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb.)、酢酱草等。

(3)红松-槭树林

有3个样方为红松-槭树林(样方5、18、21),分布于海拔751~864 m。该类群落的建群种为红松,但花楷槭、青楷槭(*Acer tegmentosum* Maxim.)、色木槭(*Acer mono* Maxim.)、紫花槭(*Acer pseudosieboldianum* (Pax) Komarov)等槭类树种所占的优势度较大,植株密度也大。灌木层、草本层优势物种为黄心卫矛、毛榛(*Corylus*

1)如需查阅“东北红豆杉所在群落物种名录”请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>)查看本期文章附录。

表1 东北红豆杉所在群落的物种组成 (分布频度 > 80%)

Table 1 Plant species composition of *Taxus cuspidata* communities (distribution frequency > 80%)

生活型 Life form	物种 Species	分布频度 Distribution frequency (%)
乔木 Tree	椴树科 <i>Tiliaceae</i>	
	紫椴 <i>Tilia amurensis</i> Rupr.	100.0
	松科 <i>Pinaceae</i>	
	红松 <i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	90.5
	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> Carr. var. <i>microsperma</i> (Lindl.) Cheng et L. K. Fu	90.5
	臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i> (Trautv.) Maxim.	85.7
	槭树科 <i>Aceraceae</i>	
	花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i> Trautv. et Mey.	95.2
	青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i> Maxim.	85.7
	桦木科 <i>Betulaceae</i>	
灌木 Shrub	风桦 <i>Betula costata</i> Trautv.	85.7
	五加科 <i>Araliaceae</i>	
	刺五加 <i>Acanthopanax senticosus</i> (Rupr. Maxim.) Harms	100.0
	猕猴桃科 <i>Actinidiaceae</i>	
	狗枣猕猴桃 <i>Actinidia kolomikta</i> (Maxim. & Rupr.) Maxim.	100.0
	卫矛科 <i>Celastraceae</i>	
	黄心卫矛 <i>Euonymus macropterus</i> Rupr.	90.5
	瘤枝卫矛 <i>Euonymus verrucosus</i> Scop.	85.7
	桦木科 <i>Betulaceae</i>	
	毛榛 <i>Corylus mandshurica</i> Maxim.	85.7
草本 Herb	蹄盖蕨科 <i>Athyriaceae</i>	
	东北蹄盖蕨 <i>Athyrium brevifrons</i> Nakai ex Kitagawa	100.0
	鳞毛蕨科 <i>Dryopteridaceae</i>	
	粗茎鳞毛蕨 <i>Dryopteris crassirhizoma</i> Nakai	100.0
	酢浆草科 <i>Oxalidaceae</i>	
	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i> L.	95.2
	莎草科 <i>Cyperaceae</i>	
	大披针薹草 <i>Carex lanceolata</i> Boott	90.5
	百合科 <i>Liliaceae</i>	
	舞鹤草 <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F. W. Schmidt	90.5
伞形科 <i>Umbelliferae</i>		
	东北羊角芹 <i>Aegopodium alpestre</i> Ledeb.	85.7

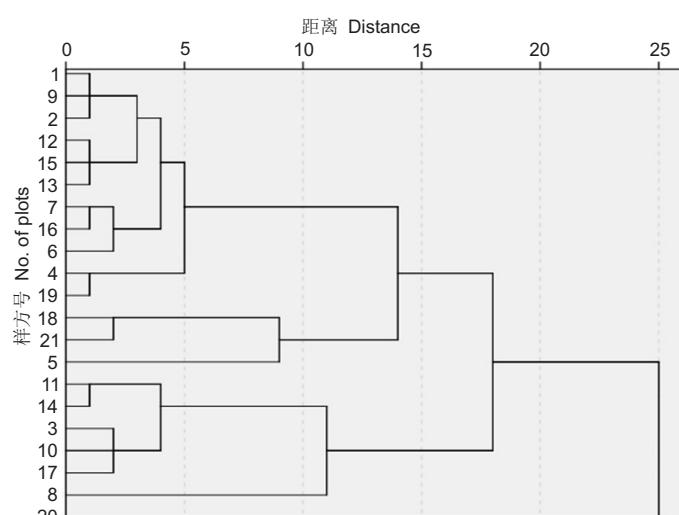


图2 各样方乔木树种聚类图

Fig. 2 Tree clustering graph for all plots

mandshurica Maxim.)、粗茎鳞毛蕨、东北羊角芹、酢浆草等。

(4) 红松-风桦林

有1个样方为红松-风桦林(样方20), 分布海拔为874 m。该群落共建种为红松和风桦(*Betula costata* Trautv.), 乔木层伴有花楷槭、斑叶稠李(*Padus maackii* (Rupr.) Kom.)、青楷槭等阔叶树种, 少见针叶树。灌木层、草本层优势物种为刺五加、黄心卫矛、粗茎鳞毛蕨、拟扁果草(*Ene-mion raddeanum* Regel.)等。

从表2可看出, 不同林型中东北红豆杉种群特征也不同。红松-紫椴林中的东北红豆杉种群数量、密度、胸径、树高均最大; 其次为红松-云杉-冷杉林和红松-槭树林; 偶见分布于红松-风桦林中, 且植株个体较小。

2.2.2 不同群落类型物种多样性特征

从表3可看出, 在不同群落类型中, 群落物种丰富度、香农指数、辛普森指数、均匀度指数均无显著差异($P > 0.05$), 但各多样性指数均较高, 说明东北红豆杉常分布在植物多样性较高的群落中。

2.3 东北红豆杉所在群落RDA排序分析

利用物种矩阵和环境矩阵进行RDA排序分析, 明确环境因子对东北红豆杉所在群落分布的影响。进一步对RDA结果进行置换检验, 排序轴达到极显著水平($P < 0.01$), 说明排序效果理想。在RDA排序图内, 箭头表示环境因子, 箭头连线的长度表示环境因子与群落分布的相关程度大小, 连线越长, 说明相关性越大。箭头连线和排序轴的夹角代表环境因子与排序轴的相关性大小, 夹角越小, 相关性越大。

表2 各群落类型中东北红豆杉种群特征

Table 2 Population characteristics of *Taxus cuspidata* in different community types (mean \pm SE)

林型 Forest type	样方数 Number of plots	东北红豆杉种群特征 ($DBH \geq 4$ cm) Population characteristics of <i>Taxus cuspidata</i>					
		总株数 Total number of trees	平均密度 Average density	平均胸径 Average DBH (cm)	最大胸径 Maximum DBH (cm)	平均树高 Average H (m)	最大树高 Maximum H (m)
红松-紫椴林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Tilia amurensis</i> forest	11	86	7.8 \pm 1.8	31.3 \pm 2.1	122.0	9.1 \pm 0.3	16.5
红松-云杉-冷杉林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Picea jezoensis</i> - <i>Abies nephrolepis</i> forest	6	19	3.2 \pm 0.9	8.4 \pm 1.9	34.2	5.7 \pm 0.8	15.6
红松-槭树林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Acer</i> forest	3	9	3.0 \pm 2.0	12.4 \pm 2.7	29.6	5.7 \pm 0.8	10.2
红松-风桦林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Betula costata</i> forest	1	2	2.0	4.8 \pm 0.2	4.9	3.8 \pm 0.2	4.0

表3 东北红豆杉所在群落类型的物种多样性指数特征

Table 3 Characteristics of plant diversity index of different *Taxus cuspidata* community types (mean \pm SE)

群落类型 Community type	丰富度 Margalef D	香农指数 Shannon H	辛普森指数 Simpson D	均匀度指数 Pielou E
红松-紫椴林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Tilia amurensis</i> forest	42.45 \pm 2.25	3.41 \pm 0.05	0.96 \pm 0.002	0.91 \pm 0.004
红松-云杉-冷杉林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Picea jezoensis</i> - <i>Abies nephrolepis</i> forest	41.50 \pm 3.32	3.34 \pm 0.09	0.95 \pm 0.004	0.90 \pm 0.006
红松-槭树林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Acer</i> forest	39.67 \pm 2.96	3.35 \pm 0.06	0.96 \pm 0.003	0.91 \pm 0.004
红松-风桦林 <i>Pinus koraiensis</i> - <i>Betula costata</i> forest	47.00	3.34	0.94	0.87
P-value	0.85	0.86	0.33	0.13

从图3可看出, 林型、降水和温度主要沿第1轴对群落分布起作用, 坡度、坡向、郁闭度、土壤pH主要沿第2轴对群落分布起作用。根据箭头连线长度和样方分布可知, 大部分东北红豆杉所在群落主要分布在第2、第3象限, 即东北红豆杉所在群落多分布在阔叶树种较少的林分类型和偏酸性土壤中。

结合RDA排序图和蒙特卡罗置换检验结果表明(表4), 温度、降水、林分类型、土壤pH对群落分布有极显著影响($P < 0.01$)。整体上看, 温度的决定系数值最高($R^2 = 0.75$), 降水、林分类型、土壤pH次之, 表明温度是影响东北红豆杉

所在群落分布的主要因子。但在红松-紫椴林和红松-云杉-冷杉林内, 坡度和坡位的影响更大; 在红松-槭树林中, 温度和降水是主要影响因子。说明在不同的林型中, 各环境因子的主要作用效果不一样。

2.4 植物群落空间分布的环境因子分解

将筛选出的7个环境因子分为: 气候因子(降水、温度)、地形与土壤因子(坡度、坡向、土壤pH)、生物因子(林型、郁闭度)3类, 利用方差分解分析各类环境因子对东北红豆杉所在群落的解释力(图4)。从图中可看出, 气候因子、地形与土壤因子、生物因子之间有不同程度的协同作用, 共同

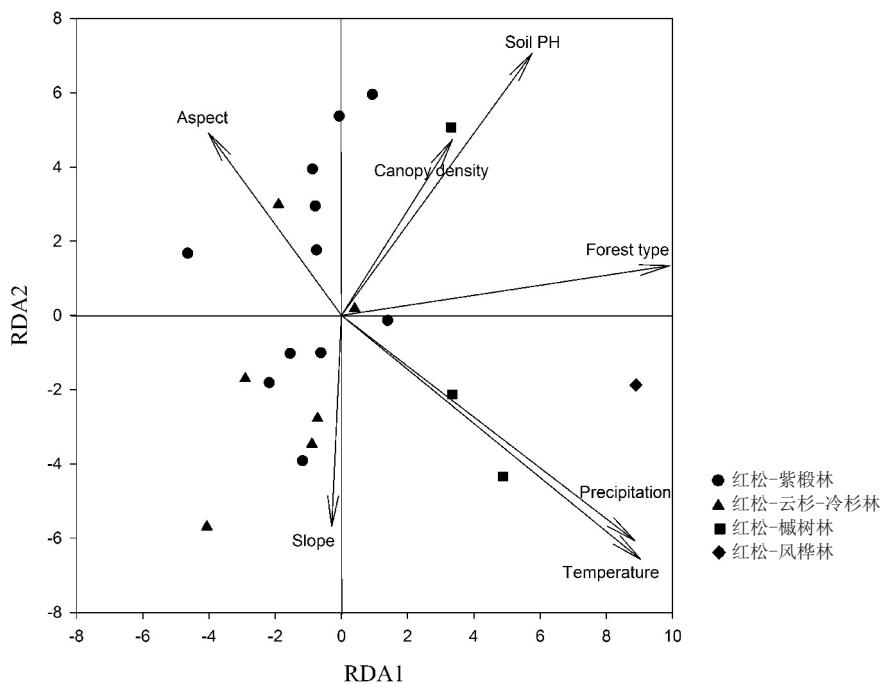
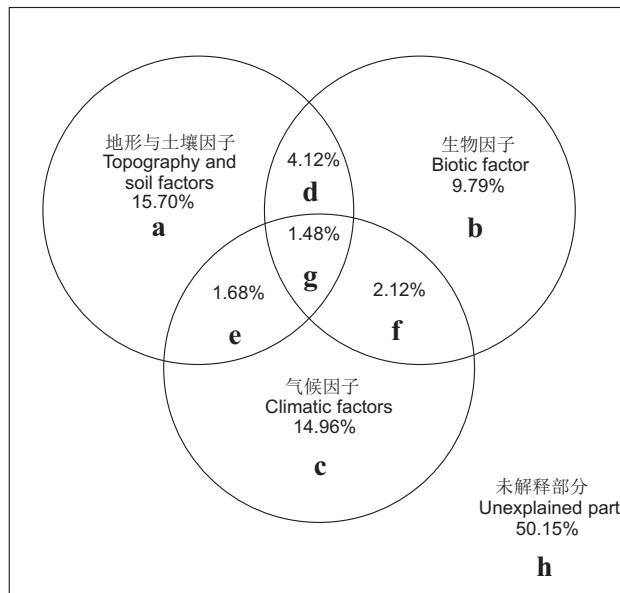


图3 RDA植物群落排序图
Fig. 3 Plant community sorting map of RDA

表4 RDA结果的蒙特卡罗置换检验
Table 4 Monte Carlo replacement test of RDA

环境因子 Environmental factors	第1轴 RDA 1	第2轴 RDA 2	R^2	P-value
降水 Precipitation	0.87106	-0.49118	0.6964	0.001 ***
温度 Temperature	0.85779	-0.514	0.75	0.001 ***
坡度 Slope	-0.0605	-0.99817	0.1702	0.165
坡向 Aspect	-0.70536	0.70885	0.2313	0.108
土壤 pH Soil pH	0.70411	0.7101	0.4742	0.003 **
林分类型 Forest type	0.99405	0.10889	0.6389	0.001 ***
郁闭度 Canopy density	0.65168	0.75849	0.1892	0.153

Notes: *** , $P < 0.001$; ** , $P < 0.01$.



圆圈代表各环境因子总的解释力。a、b、c 分别表示各环境因子的独立作用；d、e、f、g 表示各环境因子之间的协同作用；h 表示剩余未解释部分。

Circles represent total explanatory power of each environmental factor. a, b, and c represent independent roles of environmental factors, respectively; d, e, f, and g represent synergy between various environmental factors; h represents unexplained portion.

图4 各类环境因子对东北红豆杉所在群落的解释率

Fig. 4 Explanatory power of different environmental factors for *Taxus cuspidata* communities

解释了 49.85% 的群落分布。其中，地形与土壤因子对东北红豆杉所在群落的单独解释力最大(为 15.70%)，即地形与土壤因子是影响东北红豆杉所在群落的主控因子；其次，气候因子的单独解释力为 14.96%；生物因子的单独解释力为 9.79%。剩余的 50.15% 为未解释部分，说明还有其他因素影响着东北红豆杉所在群落。

3 讨论

3.1 东北红豆杉所在群落类型和特征

本研究显示，目前我国东北地区的东北红豆杉所在群落主要分布在海拔 700 ~ 900 m，这与吴榜华等^[15]的前期研究不同，可能是近年来东北红豆杉所在群落遭受严重采伐干扰致使种群分布范围发生变化^[24]。吴榜华等^[25]研究指出东北红豆杉常混生在针阔混交林内，而刘彤^[13]对黑龙江省穆棱自然保护区的研究表明，东北红豆杉主要分布在红松云冷杉林中。我们通过对东北地区的天然东北红豆杉所在群落进行全面、系统的调查发现，其群落类型多样，聚类分析得出 4 个林分类型(红松-紫椴林、红松-云杉-冷杉林、红松-槭树林、红松-风桦林)，其中东北红豆杉分布最为集中的是红

松-紫椴林和红松-云杉-冷杉林。李云灵^[26]的研究表明，紫椴和东北红豆杉之间具有极显著的种间正关联性，这也从侧面验证了东北红豆杉主要分布在红松-紫椴林内。即在我国东北地区，天然东北红豆杉种群常与红松、紫椴、臭冷杉、鱼鳞云杉、槭树等针阔叶树种混生形成稳定群落，且分布群落物种丰富，生活型多样，乔木层、灌木层和草本层构成了良好的群落结构，各群落之间物种多样性无显著差异($P > 0.05$)，但多样性指数均较高。

在不同的群落类型中东北红豆杉表现出不同的种群特征，其中红松-紫椴林内的东北红豆杉种群生长最佳，分布个体也最多。野外调查发现，即使同一群落类型的群落组成结构也有不同程度的差别，这可能与人为干扰程度有关。另外，部分散生东北红豆杉个体也分布于其他类型次生林中，这可能是重度采伐和干扰后遗留下来的，但对于回归保护地的选择具有很好的指示作用。

3.2 环境因子对群落的影响

植物群落是物种与物种、物种与环境之间在各种因素影响下长期适应的结果^[1]，对植物群落分布及其限制因子的研究是生态学的热点问题，也是

保护生物学研究的基础。在小尺度下, 海拔、地形、生物、土壤等因子常通过影响水热条件、光照、养分等生态因子的再分配来影响植物群落。例如余敏等^[23]研究认为, 影响山西空灵山小蛇沟林下草本植物分布的主要因素是林分类型、土壤养分和坡度; 马全林等^[27]研究认为, 海拔是影响乌兰布和沙漠植被物种组成及其分布的主要因子。对于不同植物群落, 环境因子的作用也各不相同, 例如杨国栋等^[28]研究认为, 影响东拉山中国特有植物短丝木犀 (*Osmanthus serrulatus* Rehd.) 植物群落类型及空间分布的重要环境因子是土壤有机质和腐殖质含量; 张志敏等^[29]研究认为, 海拔和土壤含水量是影响江苏龙池山自然保护区红楠 (*Machilus thunbergii* Sieb. et Zucc.) 生存群落分布与扩张的重要影响因子。

我们以东北地区天然东北红豆杉所在群落为对象进行研究, 结果表明温度是影响东北红豆杉所在群落分布的主要因子, 其次是降水、林分类型和土壤 pH。而刘彤^[13]对黑龙江穆棱自然保护区的研究表明, 海拔梯度是影响天然东北红豆杉生存群落分布的决定性因子, 其次是坡位和坡度。两者的差异可能与研究区域和尺度不同有关。进一步通过方差分解, 表明气候因子(温度、降水)、地形与土壤因子(土壤 pH、坡度、坡位)、生物因子(林型、郁闭度)三者对东北红豆杉所在群落分布格局的共同解释率为 49.85%, 其中地形与土壤因子的单独解释力最大, 这可能与东北红豆杉种群喜酸性土壤, 且多分布在阴坡和缓坡地带等因素有关。但仍存在 50.15% 的未解释部分, 说明还有其他影响因素未能解释, 如历史事件、人为干扰、种间竞争等因素都会对群落结构产生影响^[30, 31]。

3.3 保护建议

东北红豆杉常集中分布于地形较平坦的阴坡和半阴坡的红松-紫椴林、红松-云杉-冷杉林内。但群落内东北红豆杉种群特征差别较大, 这可能与盗挖盗采、砍枝剪枝等人为干扰有关。从保护东北红豆杉生境的角度出发, 建议加强对现存东北红豆杉种群数量较多的区域进行严格保护, 包括吉林省汪清县、和龙市和黑龙江省穆棱自然保护区; 对有零散个体分布的区域可以适当开展野外回归、种群恢复。有研究表明高物种多样性有利于促进红豆杉属植物的更新和生长^[32], 因此在东北红豆杉种群保

护过程中, 也应该有效保护那些适宜东北红豆杉分布的群落物种多样性。

参考文献:

- [1] 李俊清. 森林生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [2] 杨国栋, 季芯悦, 陈林, 钟育谦, 翟飞飞, 伊贤贵, 王贤荣. 基于 SOM 的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释 [J]. 生物多样性, 2018, 26(12): 1268-1276.
- [3] Yang GD, Ji XY, Chen L, Zhong YQ, Zhai FF, Yi XG, Wang XR. Spatial distribution and environmental interpretation of wild *Sinojackia xylocarpa* communities based on self-organizing map (SOM) [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(12): 1268-1276.
- [4] 姚帅臣, 王景升, 丁陆彬, 包小婷, 李超, 王彤, 等. 拉萨河谷草地群落的数量分类与排序 [J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [5] Yao SC, Wang JS, Ding LB, Bao XT, Li C, Wang T, et al. Quantitative classification and ordination of grassland communities in Lhasa River Valley [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [6] 刘晔, 许玥, 石松林, 彭培好, 沈泽昊. 金沙江干旱河谷植物群落的数量分类及其结构分异的环境解释 [J]. 生物多样性, 2016, 24(4): 407-420.
- [7] Liu Y, Xu Y, Shi SL, Peng PH, Shen ZH. Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(4): 407-420.
- [8] Wani MC, Taylor HL, Wall ME, Coggon P, McPhail AT. Plant antitumor agents: VI. The isolation and antitumor agent from *Taxus brevifolia* [J]. *J Am Chem Soc*, 1971, 93(9): 2325-2327.
- [9] 费永俊, 雷泽湘, 余昌均, 陈中义, 何信. 中国红豆杉属植物的濒危原因 [J]. 自然资源学报, 1997(5): 61-65.
- [10] Fei YJ, Lei ZX, Yu CJ, Chen ZY, He J. The endangered causes of Chinese *Taxus* and countermeasures for sustainable utilization [J]. *Journal of Natural Resources*, 1997(5): 61-65.
- [11] 贯润国, 董鸣, 李俊清, 陈小勇, 曾宋君, 江明喜, 等. 典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7130-7135.
- [12] Zang RG, Dong M, Li JQ, Chen XY, Zeng SJ, Jiang MX, et al. Conservation and restoration for typical critically endangered wild plants with extremely small population [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7130-7135.
- [13] Park SY, Lee CK, Bae YS. A tetrasaccharide isolated from the fruits of *Taxus cuspidata* [J]. *Pharm Biol*, 2012, 50(5):

- 592–592.
- [9] Lee CG, Lee J, Lee DG, Kim JW, Alnaeeli M, Park YI, Park JK. Immunostimulating activity of polyhydric alcohol isolated from *Taxus cuspidata* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 85: 505–513.
- [10] Zhao Y, Wang Z, Wei HX, Bao YJ, Gu P. Effect of prolonged photoperiod on morphology, biomass accumulation and nutrient utilization in post transplant *Taxus cuspidata* seedlings [J]. *Pak J Bot*, 2017, 49(4): 1285–1290.
- [11] 李威, 杨德光, 牟尧, 杨自超, 王雪蓉, 刘彤彤, 李淑敏. 去遮荫后东北红豆杉幼苗和幼树光合特性对比 [J]. 林业科学, 2018, 54(2): 179–185.
- Li W, Yang DG, Mu Y, Yang ZC, Wang XR, Liu TT, Li SM. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of seedlings and saplings of *Taxus cuspidata* after removing shade [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(2): 179–185.
- [12] 吴榜华, 臧润国, 张启昌, 李德志, 郝广明. 东北红豆杉种群结构与空间分布型的分析 [J]. 吉林林学院学报, 1993, 9(2): 1–6.
- Wu BH, Zang RG, Zhang QC, Li DZ, Hao GM. Analysis on the population structure and distribution pattern of *Taxus cuspidata* [J]. *Journal of Jilin Forestry University*, 1993, 9(2): 1–6.
- [13] 刘彤. 天然东北红豆杉种群生态学研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [14] 周志强, 刘彤, 袁继连. 黑龙江穆棱天然东北红豆杉种群资源特征研究 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 476–482.
- Zhou ZQ, Liu T, Yaun JL. Population characteristics of yew (*Taxus cuspidata*) in the Muling Yew Nature Reserve, Heilongjiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 28(4): 476–482.
- [15] 吴榜华, 臧润国. 东北红豆杉植物地理学研究 [J]. 应用与环境生物学报, 1995(3): 219–225.
- Wu BH, Qi JZ. Study on phytogeography of *Taxus cuspidata* [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1995(3): 219–225.
- [16] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533–548.
- Fang JY, Wang XP, Shen ZH, Tang ZY, He JS, Yu D, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 孙儒泳. 基础生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [19] 张屯金. 数量生态学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [20] 张锦春, 王继和, 赵明, 刘虎俊, 廖空太, 徐先英. 库姆塔格沙漠南缘荒漠植物群落多样性分析 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 375–382.
- Zhang JC, Wang JH, Zhao M, Liu HJ, Liao KT, Xu XY. Plant community and species diversity in the south fringe of Kumtag Desert [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 375–382.
- [21] 赵小娜, 秦浩, 张峰. 山西文峪河上中游森林群落多样性 [J]. 生态学报, 2017, 27(4): 1093–1102.
- Zhao XN, Qin H, Zhang F. Diversity of forest communities in the upstream and middle reaches of the Wenyu River watershed, Shanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 27(4): 1093–1102.
- [22] Borcard D, Gillet F, Legendre P. 数量生态学: R 语言的应用 [M]. 赖江山 译. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [23] 余敏, 周志勇, 康峰峰, 欧阳帅, 米湘成, 孙建新. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 373–383.
- Yu M, Zhou ZY, Kang FF, Ouyang S, Mi XC, Sun JX. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshegou of Lingkong Mountain, Shanxi, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(5): 373–383.
- [24] 陈杰, 龙婷, 杨蓝, 王寅, 徐超, 李景文. 东北红豆杉生境适宜性评价 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 51–59.
- Chen J, Long T, Yang L, Wang Y, Xu C, Li JW. Habitat suitability assessment of *Taxus cuspidata* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(4): 51–59.
- [25] 吴榜华, 张启昌, 李德志, 臧润国. 东北红豆杉资源状况及生长规律的初步调查 [J]. 吉林林学院学报, 1993(2): 11–16.
- Wu BH, Zhang QC, Li DZ, Zang RG. A preliminary investigation on resource condition and growth regularity of *Taxus cuspidata* [J]. *Journal of Jilin Forestry University*, 1993(2): 11–16.
- [26] 李云灵. 东北红豆杉种间关系研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [27] 马全林, 张德奎, 袁宏波, 郑庆钟, 丁峰, 张锦春, 等. 乌兰布和沙漠植被数量分类及环境解释 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 160–167.
- Ma QL, Zhang DK, Yuan HB, Zheng QZ, Ding F, Zhang JC, et al. Numerical classification and environmental interpretation of desert vegetation in the Ulan Buh Desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(9): 160–167.
- [28] 杨国栋, 钱慧蓉, 陈林, 王贤荣. 中国特有植物短丝木犀 (*Osmanthus serrulatus* Rehd.) 群落结构及其环境解释 [J].

- 生态学报, 2018, 38(9): 3059–3068.
- Yang GD, Qian HR, Chen L, Wang XR. Analysis of community structure of *Osmanthus serrulatus* based on TWINSPAN classification and DCCA sequencing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3059–3068.
- [29] 张志敏, 杨国栋, 谢梦梦, 钟育谦, 翟飞飞, 王贤荣, 伊贤贵. 江苏龙池山自然保护区红楠(*Machilus thunbergii*)生存群落结构及其环境解释[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1637–1645.
- Zhang ZM, Yang GD, Xie MM, Zhong YQ, Zhai FF, Wang XR, Yi XG. Community structure and environmental interpretation of *Machilus thunbergii* in Mountain Longchi, Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(6): 1637–1645.
- [30] 朱羚, 金一兰, 丛日慧, 刘庆福, 丁勇, 张庆. 环境因素及种间竞争在群落多样性格局中的作用[J]. 干旱区研究,
- 2018, 35(6): 1427–1435.
- Zhu L, Jin YL, Cong RH, Liu QF, Ding Y, Zhang Q. Effects of environmental factors and interspecific competition in community biodiversity pattern[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1427–1435.
- [31] 牛莉芹. 人类干扰对五台山森林群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 300–312.
- Niu LQ. Effects of anthropogenic disturbance on forest community structure in Wutai Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(2): 300–312.
- [32] Vencurik J, Bosela M, Sedmakova D, Pittner J, Kucbel S, Jaloviar P, et al. Tree species diversity facilitates conservation efforts of European yew[J]. *Biodivers Conserv*, 2019, 28(4): 791–810.

(责任编辑: 张平)